

多馈入直流系统短路比和有效短路比研究

李召兄¹ 吴 丽¹ 苗文静²

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘 要: 传统短路比作为评价与直流输电系统相连交流系统相对强弱的重要量化指标, 在单馈入直流系统中得到了广泛应用; 但是这种短路比定义不适用于多馈入直流系统, 所以, 给出合理的多馈入短路比定义是十分必要的。目前学术界存在两种多馈入短路比计算方法, 即等值阻抗法和影响因子法。在综述两种方法的基础上, 证明了两种方法的一致性; 同时指出了前人在理解等值阻抗法时的误区。将 BPA 中 3 机 9 节点系统进行改造, 得到三馈入直流系统模型。在此模型中, 通过计算和仿真, 验证了等值阻抗法和影响因子法的统一性; 另外, 也得到了多馈入短路比小于单馈入短路比的结论。

关键词: 多馈入直流系统; 多馈入短路比; 多馈入有效短路比; 多馈入影响因子; 等值阻抗法; 影响因子法; 高压直流输电

Abstract: As a key quantitative indicator for evaluating the relative strength of AC systems in single - infeed direct current systems, the short - circuit ratio is widely used. But it is not applicable to multi - infeed direct current systems any more. Therefore, giving the reasonable definition of the multi - infeed short - circuit ratio is very necessary. At present, there are two calculation methods about multi - infeed short - circuit ratio in academic circle, that is, short - circuit impedance method and multi - infeed interaction factor method. By exploring the origin the theoretical analysis and formula derivation of these two methods are done. On this base, the unity of these two methods are proved, and the understanding mistake in the short - circuit impedance method is pointed out. A three - infeed direct current system model is built by remaking the 3 - machine 9 - node system in BPA. In this model, the simulation analysis is carried out, which proves the consistency of these two methods. In addition, the conclusion is also obtained that the multi - infeed short - circuit ratio is less than the single - infeed short circuit ratio.

Key words: multi - infeed direct current system; multi - infeed short - circuit ratio; multi - infeed effective short - circuit ratio; multi - infeed interaction factor; equivalent impedance method; impact factor method; high - voltage direct current

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2016)05 - 0019 - 07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.005

0 引 言

当多回直流输电系统向同一交流系统输送电能时, 输电受端便形成了多馈入直流(multi - infeed direct current, MIDC)系统。近年来, 随着电网的建设和高压直流输电技术的发展, 在中国出现了 2 个典型的 MIDC 系统。三峡—黄渡、三峡—上海、三峡—常州和葛南高压直流输电工程, 形成 4 回直流馈入华东电网的格局。南方电网也有 4 回直流馈入广东, 分别是天广、三广、贵广 I 和贵广 II 高压直流输电工程。

对于 MIDC 系统, 由于交直流系统之间、直流与直流子系统之间的相互影响, 使得其暂态、中期和长期的动态特性, 稳定分析和控制协调更为复杂, 需要做系统深入的专门研究。研究结果表明^[1-3], 连接到弱交流系统的直流输电系统在运行中可能出现暂态/动态过电压、电压稳定性、谐波谐振、逆变器易发生换相失败且难以恢复等问题。

传统短路比(short circuit ratio, SCR)/有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)作为一种衡量与直流输电系统相连交流系统相对强弱的指标, 可以简单、有效地反映出单馈入直流系统(只有一回直流输电系统向交流系统输送电能时, 输电受端所

形成的系统)的稳定情况,对设计、规划、运行人员具有指导意义。然而,在 MIDC 系统中,当多个逆变站之间的电气距离不能视为无穷大而必须计及相互间影响时,采用针对单馈入直流系统的计算方法对各个逆变站分别计算 SCR/ESCR,并依此评估交流系统的相对强弱是不恰当的。因此,给出合理的多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MISCR)/多馈入有效短路比(multi-infeed effective short-circuit Ratio, MIESCR)计算方法具有重要意义。

这里首先综述了学术界存在的两种 MISCR/MIESCR 计算方法(等值阻抗法^[4]和影响因子法^[5]),同时指出前人在理解等值阻抗法时的误区;接着利用 P-Q 分解法证明了等值阻抗法和影响因子法的一致性;最后将 BPA 中 3 机 9 节点系统进行改造,得到了三馈入直流系统模型。利用此模型验证了两种方法的统一性,也得到了多馈入短路比小于相应单馈入短路比的结论。

1 等值阻抗法

1.1 等值阻抗法

将 MIDC 系统在各回直流逆变侧换流母线处进行多端口戴维南等值^[6],可以得到图 1 所示的等值电路。

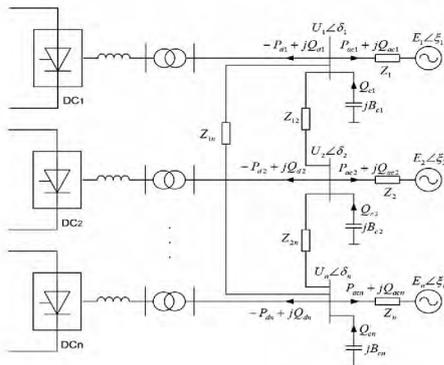


图 1 多馈入直流系统戴维南等值电路

在图 1 中,得到从各回直流逆变侧换流母线处看进去的交流系统等值节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} & \cdots & Z_{eq1n} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} & \cdots & Z_{eq2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{eqn1} & Z_{eqn2} & \cdots & Z_{eqnn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_{eqii} 为第 i 回换流母线的自阻抗; Z_{eqij} 为第 i 和

第 j 回换流母线间的互阻抗($i, j = 1, 2, \dots, n, j \neq i$)。

从式(1)中可以得到第 j 回直流对第 i 回直流的功率影响 P_{dij} 为

$$P_{dij} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj} \quad (2)$$

式中 P_{dj} 为第 j 回直流的额定直流功率。

考虑所有其他回直流的影响后,可以得到第 i 回直流的 MISCR/MIESCR 为

$$MISCR_i = \frac{S_{SCi}}{P_{dieq}} - \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \quad (3)$$

$$MIESCR_i = \frac{S_{SCi} - Q_{ci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \quad (4)$$

式中: S_{SCi} 为第 i 回直流逆变侧换流母线处的三相短路容量; P_{dieq} 为考虑了其他回直流影响后第 i 回直流的等值直流功率; P_{di} 为第 i 回直流的额定功率; Q_{ci} 为第 i 回直流换流母线在额定电压下的无功补偿容量。

1.2 MISCR 与 SCR 的关系

在图 2 所示的两馈入直流系统中,节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} & \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} \\ \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} & \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

文献[4]认为当 $Z_{12} \rightarrow \infty$ 时是两个单馈入直流系统,两馈入短路比分别等于其单馈入短路比。

$$Z_{eq11} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = Z_1 \quad (6)$$

$$Z_{eq12} = Z_{eq21} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = 0 \quad (7)$$

$$Z_{eq22} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = Z_2 \quad (8)$$

$$MISCR_1 = \frac{1}{|Z_1| P_{d1}} = SCR_1 \quad (9)$$

$$MISCR_2 = \frac{1}{|Z_2| P_{d2}} = SCR_2 \quad (10)$$

按这种理解方法,可以得到

$$MISCR_1 = SCR_1 \cdot \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2}} \quad (11)$$

$$MISCR_2 = SCR_2 \cdot \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1|P_{d1} + |Z_1 + Z_{12}|P_{d2}} \quad (12)$$

在式(11)和式(12)中,令

$$\alpha_1 = \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2}} = \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2} - |Z_1|P_{d1}} \quad (13)$$

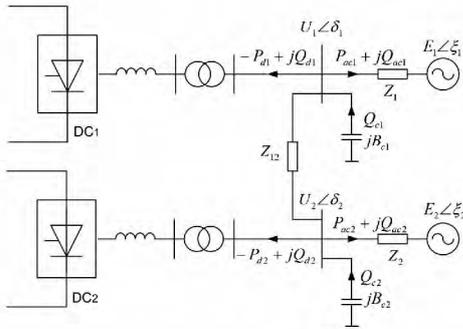


图2 两馈入直流系统戴维南等值电路

$$\alpha_2 = \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1|P_{d1} + |Z_1 + Z_{12}|P_{d2}} = \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2} + |Z_1|P_{d1} - |Z_2|P_{d2}} \quad (14)$$

对式(13)和式(14)进行如下分析:

1) 若 $SCR_1 < SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} > |Z_2|P_{d2}$, 则 $\alpha_1 > 1, 0 < \alpha_2 < 1$, 从而 $MISCR_1 > SCR_1, MISCR_2 < SCR_2$;

2) 若 $SCR_1 = SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} = |Z_2|P_{d2}$, 则 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1$, 从而 $MISCR_1 = SCR_1 = MISCR_2 = SCR_2$;

3) 若 $SCR_1 > SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} < |Z_2|P_{d2}$, 则 $0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1$, 从而 $MISCR_1 < SCR_1, MISCR_2 > SCR_2$ 。

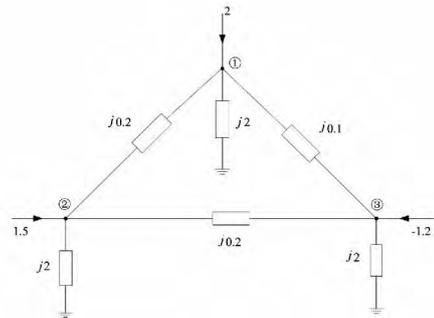
因此, $SCR_1 \neq SCR_2$ 时, 单馈入短路比小的直流系统其两馈入短路比增加, 而单馈入短路比大的其两馈入短路比减小; $SCR_1 = SCR_2$ 时, 同一直流系统的单馈入短路比与两馈入短路比相等。

一般来说, 和其单馈入短路比相比, 多馈入短路比不可能增加或者不变。以下举例说明正确的理解方法。在图3(a)所示的三节点电力系统中, 以节点①和节点②为端口a、节点③和地为端口b的二端

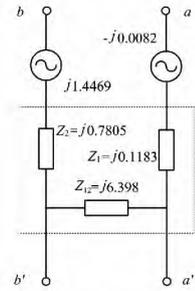
口戴维南等值节点阻抗矩阵为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0.1164 & 0.0127 \\ 0.0127 & 0.6970 \end{bmatrix} \quad (15)$$

可知 $Z_{eq22} = j0.6970$ 。从而可以得到图3(a)的二端口戴维南等值电路如图3(b)。再对节点③与地组成的端口作一端口等值, 则 $Z = j0.6970$, 可见与二端口等值中的 Z_{eq22} 是相等的, 而不等于图3(b)中的 $Z_2 = j0.7805$, 所以对 $Z_{12} \rightarrow \infty$ 时多馈入的短路比应理解为



(a) 三节点电力系统



(b) 二端口戴维南等值电路

图3 二端口等值示例图

$$MISCR_2 = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{U_2^2 / |Z_{eq22}|}{P_{d2} + \left| \frac{Z_{eq21}}{Z_{eq22}} \right| P_{d1}} = \frac{U_2^2 / |Z_{eq22}|}{P_{d2}} \quad (16)$$

由此可见, 单馈入短路比是多馈入短路比的一种特例, 两者是统一的。另外, 还可以看出, 直流回路的增加不会改变各个换流母线处的短路容量, 考虑了直流之间的相互影响后, 多馈入短路比肯定比相应单馈入短路比小。

2 影响因子法

影响因子法的前提是多馈入相互作用因子

(multi - infeed interaction factor, MIIF)。MIIF 定义为: 当所考察的直流输电系统以额定直流功率运行时, 在其逆变站换流母线上投入一条并联无功功率支路, 造成其换流母线约 1% 的电压跌落(用 ΔU_i 表示) 检测其他逆变站换流母线电压的下降量 ΔU_j , 则 ΔU_j 与 ΔU_i 的比值即为逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子, 记为 $MIIF_{ji}$ 。

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \quad (17)$$

根据 $MIIF_{ji}$ 的定义, 在包含 n 回直流的多馈入系统中, 可以生成一个 $n \times n$ 阶的 MIIF 矩阵。其非对角元素在 0 ~ 1 之间, 该值的大小反映逆变站 i 和 j 之间电气耦合的紧密程度; 对角线元素全部为 1。

在定义 MIIF 的基础上, 就可以定义 MISCR/MI-ESCR。对于多馈入直流系统中的逆变站 i , 考虑所有其他直流逆变站相互作用后的短路比和有效短路比分别为

$$MISCR_i = \frac{S_{SCi}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (MIIF_{ji} P_{dj})} \quad (18)$$

$$MISCR_i = \frac{S_{SCi} - Q_{ci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (MIIF_{ji} P_{dj})} \quad (19)$$

3 两种短路比的关系

以如图 4 所示的三馈入系统为例, 说明前述两种短路比的关系。

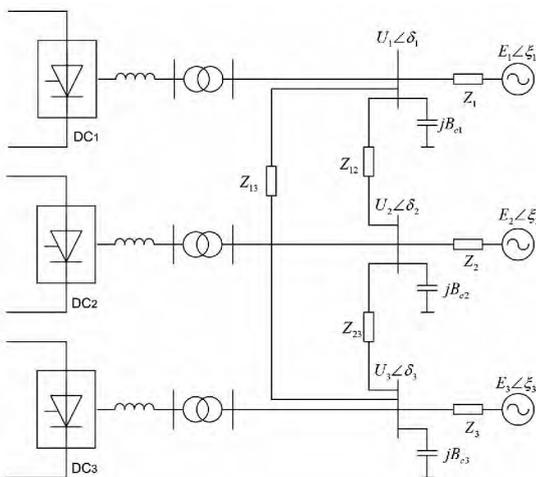


图 4 三馈入直流系统

在图 4 所示系统中, 对受端交流系统应用 $P-Q$ 分解法有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 / U_1 \\ \Delta Q_2 / U_2 \\ \Delta Q_3 / U_3 \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} \\ &= -B \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = -Y_{eq} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

其中矩阵 B 由节点导纳矩阵 Y_{eq} 的虚部组成, 忽略线路的电阻, 矩阵 B 即为节点导纳矩阵 Y_{eq} 。则节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$\begin{aligned} Z_{eq} = B^{-1} &= \frac{1}{\det(B)} \\ &\begin{bmatrix} B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32} & -(B_{12}B_{33} - B_{13}B_{32}) & B_{12}B_{23} - B_{13}B_{22} \\ -(B_{21}B_{33} - B_{23}B_{31}) & B_{11}B_{33} - B_{13}B_{31} & -(B_{11}B_{23} - B_{13}B_{21}) \\ B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31} & -(B_{11}B_{32} - B_{12}B_{31}) & B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} & Z_{eq13} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} & Z_{eq23} \\ Z_{eq31} & Z_{eq32} & Z_{eq33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

为求逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子 $MIIF_{ji}$, 假定 $\Delta Q_j = 0$ 。则 $MIIF_{21}$ 和 $MIIF_{31}$ 可由式 (22) 求得, 见式 (23) 和式 (24)。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$MIIF_{21} = - \frac{B_{21}B_{33} - B_{23}B_{31}}{B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32}} = \left| \frac{Z_{eq12}}{Z_{eq11}} \right| \quad (23)$$

$$MIIF_{31} = \frac{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}{B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32}} = \left| \frac{Z_{eq13}}{Z_{eq11}} \right| \quad (24)$$

所以有式 (25), 同理可得式 (26) 和式 (27)。

$$\begin{aligned} MISCR_1 &= \frac{S_{SC1}}{P_{d1} + \sum_{j=1, j \neq 1}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq1j}}{Z_{eq11}} \right| P_{dj} \right)} \\ &= \frac{S_{SC1}}{P_{d1} + \sum_{j=1, j \neq 1}^3 (MIIF_{j1} P_{dj})} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} MISCR_2 &= \frac{S_{SC2}}{P_{d2} + \sum_{j=1, j \neq 2}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq2j}}{Z_{eq22}} \right| P_{dj} \right)} \\ &= \frac{S_{SC2}}{P_{d2} + \sum_{j=1, j \neq 2}^3 (MIIF_{j2} P_{dj})} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} MISCR_3 &= \frac{S_{SC3}}{P_{d3} + \sum_{j=1, j \neq 3}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq3j}}{Z_{eq33}} \right| P_{dj} \right)} \\ &= \frac{S_{SC3}}{P_{d3} + \sum_{j=1, j \neq 3}^3 (MIIF_{j3} P_{dj})} \end{aligned} \quad (27)$$

可见,对于三馈入系统,两种短路比计算得到的结果一样。对于多馈入系统,按上述方法推导,也可得到两种短路比在本质上是一致的。

4 三馈入算例

将 BPA 中 3 机 9 节点模型进行改造,在 PSCAD/EMTDC 软件中建立如图 5 所示的三馈入直流系统。其中三回直流 DC₁、DC₂ 和 DC₃ 的具体参数见表 1,其控制系统采用 Cigre 标准测试系统模型,整流侧和逆变侧的无功补偿容量分别按额定直流功率的 50% 和 60% 配置。

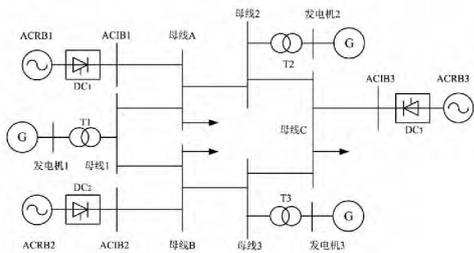


图 5 三馈入直流系统结构图

表 1 直流系统参数

| 直流回路 | DC ₁ 、DC ₃ | DC ₂ |
|------|----------------------------------|-----------------|
| 额定电压 | ± 250 kV | ± 500 kV |
| 额定电流 | 3 kA | 3 kA |
| 额定功率 | 1 500 MW | 3 000 MW |
| 角度 | 触发角 | 15° |
| | 熄弧角 | 18° |
| 控制方式 | 整流侧 | 定电流 |
| | 逆变侧 | 定熄弧角 |

整流侧和逆变侧交流系统均为 500 kV,送端系统等值为 3 个理想电压源,受端交流系统发电机采用次暂态数学模型;负荷采用恒阻抗模型。

4.1 等值阻抗法

图 5 所示系统三回直流逆变侧换流母线处短路时系统的等值电路如图 6 所示。图中以节点⑦与地、节点⑧与地和节点⑨与地构成三端口,得到的三端口等值阻抗矩阵为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} 0.0007 + 0.0051i & 0.0007 + 0.0017i & 0.0006 + 0.0017i \\ 0.0007 + 0.0017i & 0.0008 + 0.0041i & 0.0007 + 0.0017i \\ 0.0006 + 0.0017i & 0.0007 + 0.0017i & 0.0007 + 0.0051i \end{bmatrix} \quad (28)$$

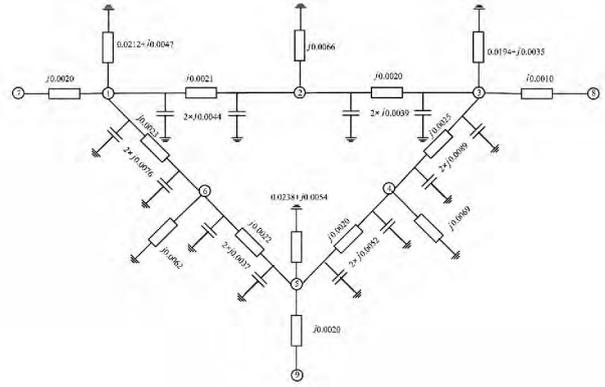


图 6 计算 MISCR 时系统短路图

从而得到 DC₁ 的多馈入短路比和单馈入短路比分别为

$$MISCR_1 = \frac{1}{|Z_{eq11}|P_{d1} + |Z_{eq12}|P_{d2} + |Z_{eq13}|P_{d3}} = \frac{1}{0.0051 \times 15 + 0.0018 \times 30 + 0.0018 \times 15} = 6.349 \quad (29)$$

$$SCR_1 = \frac{1}{|Z_{eq11}|P_{d1}} = \frac{1}{0.0051 \times 15} = 13.072 \quad (30)$$

同理,得到 DC₂ 的多馈入短路比和单馈入短路比分别为 5.556、7.937; DC₃ 分别为 6.349、13.072。

图 7(线路对地导纳同图 6)所示为计算 MI-ESCR 时系统短路图,则计算多馈入有效短路比的等值节点阻抗矩阵为

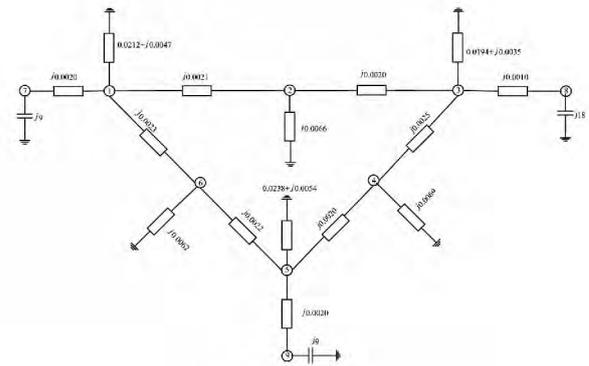


图 7 计算 MIESCR 的系统短路图

$$Z_{ceq} = \begin{bmatrix} 0.0009 + 0.0054i & 0.0009 + 0.0020i & 0.0008 + 0.0019i \\ 0.0009 + 0.0020i & 0.0010 + 0.0045i & 0.0008 + 0.0019i \\ 0.0008 + 0.0019i & 0.0008 + 0.0019i & 0.0008 + 0.0054i \end{bmatrix} \quad (31)$$

从而得到 DC₁、DC₂ 和 DC₃ 的多馈入有效短路比分别为 5.556、4.938 和 5.650; 相应的单馈入有效短路比分别为 12.121、7.246 和 12.121。

4.2 影响因子法

根据 MIF 的定义,可以得到如图 8 所示的仿真波形。

3)在三馈入直流系统中,通过仿真分析,得到考虑直流之间的相互影响后,多馈入短路比小于单馈入短路比。表明如果采用单馈入短路比去评价多馈入系统中交流系统的强弱,必然导致评价结果过于乐观。

参考文献

[1] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
[2] Gavrilovic A. AC/DC System Strength as Indicated by Short Circuit Ratios [C]. IEEE Conference on AC and DC Power Transmission, London, 1991.
[3] R. S. Thallam. Review of the Design and Performance Features of HVDC Systems Connected to Low Circuit Ratio AC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Deliver-

y, 1992, 7(4): 2065 - 2073.
[4] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1 - 8.
[5] 洪潮, 饶红. 多馈入直流系统的量化分析指标及其应用 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 37 - 41.
[6] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

作者简介:

李召兄(1984), 硕士、工程师, 从事电力系统一次规划设计以及电网运行分析工作;

吴丽(1984), 工程师, 从事电力系统规划及继电保护设计工作;

苗文静(1984), 硕士、工程师, 从事超高压电网继电保护及智能变电站设备运维工作。

(收稿日期: 2016 - 04 - 28)

(上接第13页)

[3] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33 - 40.
[4] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8 - 14.
[5] 杨琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042 - 2047.
[6] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105 - 110.
[7] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7 - 11.
[8] 盛超, 曾杰, 郝正航, 等. 含双馈风电场电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 133 - 137.
[9] 陈乾, 沈沉, 刘锋. 端口能量及其在风电系统暂态稳定分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 9 - 16.
[10] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学

报, 2012, 24(2): 41 - 46.

[11] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832 - 3842.
[12] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34 - 40.
[13] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399 - 3405.
[14] 韩祯祥. 电力系统分析(第五版) [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.
[15] 陈树勇, 陈会员, 唐晓俊, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514 - 519.

作者简介:

周士琼(1991), 硕士研究生, 从事新能源发电与并网技术研究;

王倩(1962), 硕士、教授, 从事电力系统调度综合自动化研究;

吕潇(1992), 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究。

(收稿日期: 2016 - 06 - 12)